



推荐阅读:

[广西城市污水处理厂污泥产生及处置现状分析](#)

[平顶山市煤矿区土壤重金属污染程度评价](#)

[基于灰色关联分析法的宜昌市空气质量影响因素分析](#)

[废旧锂离子电池流向及管理现状调研](#)

[生物法处理气态污染物的研究现状与应用前景](#)

[环境敏感区农村生活污水处理工艺设计案例分析](#)

[氨法脱硫+低温 SCR 脱硝工艺在焦炉烟气净化中的应用](#)

[反渗透双膜工艺处理印染废水研究进展](#)

[重金属污染土壤修复技术研究进展](#)

[基于 SARIMA 模型的二氧化氮时间序列预测研究](#)

[碳基功能材料在土壤修复中的应用](#)

[虾蟹壳对水中刚果红吸附性能的研究](#)

[农村生活垃圾生物质热解和燃烧气相数值模拟](#)

[基于灰色 GM\(1, 1\)模型的成都市大气污染物浓度预测](#)

[江苏省非道路移动源大气污染排放清单研究](#)

[欧盟 15 国污水污泥产生量与处理处置方法对比](#)

[基于 Hydrus-1D 的粉煤灰堆场 Cr\(VI\)在包气带中迁移规律的研究](#)

[工业废水活性炭深度处理的研究](#)



移动扫码阅读

李小炯. 煤粉工业锅炉兰炭与烟煤燃烧性能比较[J]. 能源环境保护, 2020, 34(4): 39-45.

LI Xiaojiong. Combustion performance of semi-coke and bituminous coal on industrial pulverized coal fired boilers [J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(4): 39-45.

煤粉工业锅炉兰炭与烟煤燃烧性能比较

李小炯

(1. 煤科院节能技术有限公司, 北京 100013; 2. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备
重点实验室, 北京 100013)

摘要:为合理利用兰炭并节约煤粉工业锅炉运行成本, 采用 70 MW 双燃料煤粉工业锅炉进行试验, 在不同伴燃条件下将兰炭和煤粉作为单一燃料进行燃烧。结果表明: 作为单一燃料, 兰炭燃烧过程稳定, 满足替代燃料的基本条件; 对比点火后 10 min 内的点火特性, 兰炭和煤粉燃烧过程中炉膛温度变化量分别是 388.659 °C 和 585.072 °C, 氧含量变化量分别为 11.736% 和 8.089%; 伴燃可优化燃烧进程, 降低兰炭着火难度并改善炉膛内的温度分布情况, 更有利于后续的烟气净化; 当锅炉负荷 70 MW 时, 采用燃油+长明火伴燃和无燃油伴燃时, 炉膛上部温度分别为 1 017.382 °C、989.126 °C, 燃烧强度与伴燃强度为正相关关系; 在相同负荷下, 兰炭的初始 NO_x 及 SO₂ 排放量均低于煤粉。

关键词: 燃烧性能; 点火性能; 伴燃; 污染物排放

中图分类号: X752

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2020)04-0039-07

Combustion performance of semi-coke and bituminous coal on industrial pulverized coal fired boilers

LI Xiaojiong

(1. China Coal Research Institute Company of Energy, Beijing 100013, China; 2. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to rationally use blue carbon and save the operation cost of pulverized coal industrial boilers, a 70 MW dual-fuel pulverized coal industrial boiler was used to burn semi-coke and the pulverized coal as single fuel under different conditions of combustion. The results show that as a single fuel, semi-coke shows a stable combustion process and meet the basic conditions of alternative fuels. Comparing the ignition characteristics of semi-coke and pulverized coal within 10 min after ignition, the furnace temperature changes are 388.659 °C and 585.072 °C, respectively, and the oxygen content changes are 11.736% and 8.089%, respectively. Accompanying combustion can optimize the combustion process, reduce the ignition difficulty of semi-coke and improve the temperature distribution in the furnace, which is conducive to the subsequent flue gas purification. When the boiler load is 70 MW, the temperature of the upper part of the furnace is 1 017.382 °C with fuel oil + eternal fire, and 989.126 °C without fuel oil. The combustion intensity and the accompanying combustion intensity are positively correlated. With the same load, the initial NO_x and SO₂ emissions of semi-coke are lower than those of pulverized coal.

Key Words: Combustion performance; Ignition performance; Accompanying combustion; Pollutant emission

收稿日期: 2020-07-17

基金项目: 科工节能科技发展基金重点项目 (2020JNZD-02)

作者简介: 李小炯 (1984-), 男, 河南南阳人, 硕士, 主要从事洁净煤技术研发与工程管理工作。E-mail: lixiaojiong929@163.com

0 引言

兰炭是以高挥发分的弱黏结性或不黏结性煤为原料,经中、低温干馏炭化除去煤中焦油物质和大部分挥发分后的半焦产品,因该产品在燃烧时火焰呈兰色,故称兰炭。兰炭是一种新型的炭素材料,具有“三低四高”的特点^[1],即其固定炭高、比电阻高、化学活性高、含灰份低、铝低、硫低、磷低,是目前很有发展前景的替代燃料。

煤炭的分级分质利用的一种形式就是将兰炭作为动力燃料,对于循环流化床锅炉和小型煤粉工业锅炉,可将兰炭作为单一燃料进行燃烧。为解决兰炭的着火难和燃尽难的问题,牛芳^[2]等在 10 MW 煤粉工业锅炉上使用油枪伴燃,可以实现兰炭的顺利着火和自维持稳定燃烧。张孝禹^[3]在 14 MW 循环流化床上进行试验,发现烟气再循环可使 SO_2 、 NO_x 排放浓度下降,CO 排放浓度提高,将兰炭作为燃烧可以降低污染物的排放量,但结焦是需要考虑的重要因素。一些学者为了推动兰炭在电站动力用煤领域的安全高效利用,在大型电站锅炉上进行试验,进行兰炭与煤粉掺烧试验,发现兰炭的燃烧性较烟煤差,在高温区域的燃烧速度相对较慢^[4]。将兰炭与生物质产物掺混作为燃料,可有效解决改善兰炭的着火和生物质密度低的问题。

为了合理利用兰炭,同时降低煤粉工业锅炉的运行成本,在由煤科院节能技术有限公司所研发 70 MW 双燃料工业锅炉上进行试验,分别在不同的伴燃条件将兰炭和烟煤作为单一燃料,分析了兰炭整个燃烧过程的稳定性,对比兰炭与烟煤的点火特性、以及燃烧特性和污染物排放情况,最终得出兰炭作为神东烟煤替代燃料的可行性,同时根据兰炭燃烧试验的运行参数,为优化兰炭在双燃料煤粉工业锅炉上的燃烧提供理论依据。

1 试验

1.1 试验装置

锅炉系统示意图如图 1 所示,试验锅炉为某锅炉厂制造的立式锅炉,锅炉型号 QXS70-1.6/130/70-AIII(Q),两台双锥燃烧器置炉顶,系统的主要工艺流程为:一次风携带煤粉或兰炭进入燃烧器,在燃烧器引入二次风、三次风,实现燃料的点火,在双锥燃烧器的特殊结构以及旋流叶片的作用下在燃烧器内部形成回流区,在回流区的低压低速的环境下燃料实现稳定燃烧为了解决兰炭的点火难的问题,在进行兰炭燃烧试验时在燃烧器顶部引入长明火达到引燃的目的,长明火功率为 0.6 MW,炉膛中部引入三次表彰燃料的燃烬。燃烧后的烟气进入高低温受热面,以及烟气脱硫脱硝和除尘,最终经过处理后的洁净烟气从烟囱排出。

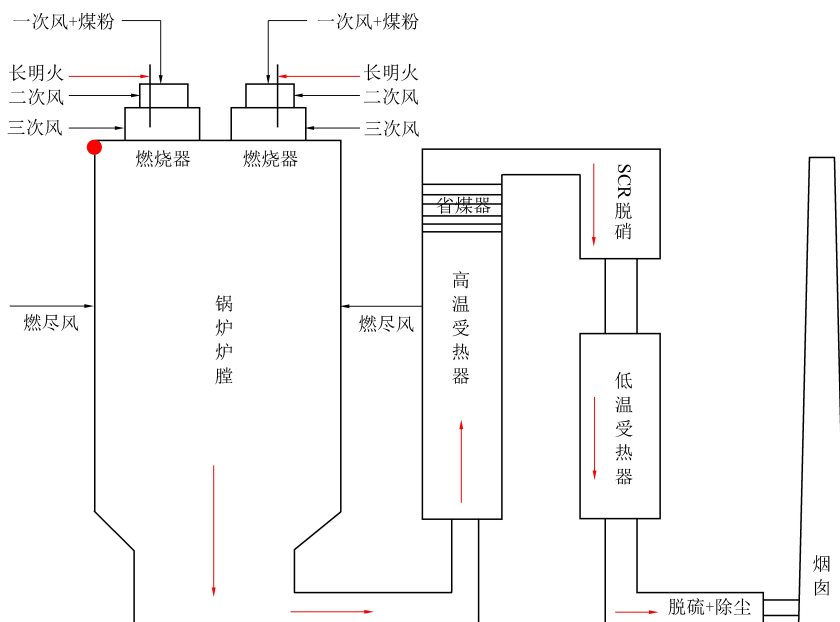


图 1 锅炉系统示意图

1.2 试验工况

试验中分别将煤粉和兰炭作为燃料,记录从

供料器开始供料至供料器停止供料过程中锅炉运行参数的变化。当二次风量为 $20\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 左右、

三次风量为 6 000 m³/h 左右,供料频率为 5 Hz,炉膛负压约为-300 Pa 时开始点火,首先点燃燃油预热燃烧器,当预燃室温度升高至 400 ℃ 以上时,使用燃油进行点火,兰炭试验中为了解决其点火难的问题,分别采用燃油+长明灯伴燃和无燃油长明灯伴燃,煤粉采用无伴燃方式进行,点火过程中通

过观察观火孔确定着火的情况。当点火成功并稳定运行一段时间后,缓慢提升锅炉负荷。

1.3 测点布置

运行过程中测量参数主要是炉膛上部温度、炉膛下部温度、炉膛出口烟气温度,高温省煤器出口氧含量,测点如图所示。

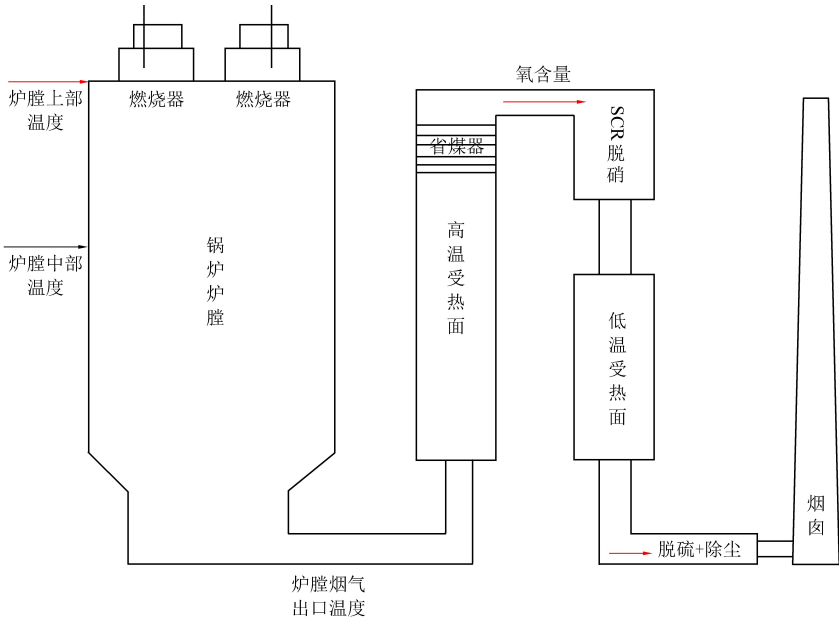


图 2 测点布置图

2 结果与分析

2.1 兰炭及烟煤煤质分析

对兰炭和烟煤进行工业分析和元素分析,结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 兰炭及烟煤工业分析结果

项目	灰分(A_{ar}) /%	水分(M_{ar}) /%	挥发分(V_{ar}) /%	固定碳(FC_{ar}) /%	低位发热量($Q_{net,ar}$) /($MJ \cdot kg^{-1}$)	全硫分($S_{t,ar}$) /%	粒度(R75) /%
兰炭	10.97	3.90	9.31	78.05	28.84	0.33	200 目过筛率 79%
烟煤	8.42	6.21	31.96	56.99	27.79	0.40	200 目过筛率 84%

表 2 兰炭及原煤元素分析结果

项目	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	$S_{t,ar}$
兰炭	81.72	1.20	4.74	0.92	0.33
烟煤	69.15	3.48	10.72	0.75	0.32

2.2 锅炉系统稳定性

检测兰炭燃烧试验中炉膛温度和氧含量,结果如图 3 所示,当运行时间为 40 min 左右时,炉膛温度以及氧含量波动变小,系统开始进行定负荷稳定运行,说明兰炭燃烧时系统较稳定,可以实现自维持稳定燃烧,具备烟煤替代燃料的最基本条件。

为验证锅炉系统稳定性,采取相同的点火步

根据上述基本煤质特性参数看出,兰炭属于低灰分、低硫分、高热量的燃料,灰分、固定碳、低位发热量较烟煤更高,从发热量来看,兰炭可以满足替代烟煤的条件,但其挥发分低,燃烧过程中可能出现点火难及结焦的问题。

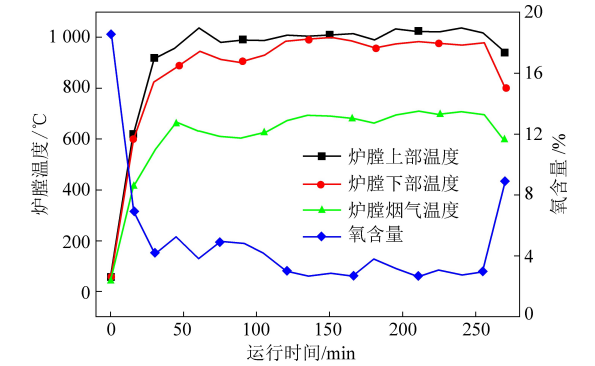


图 3 兰炭燃烧运行曲线

骤进行两次兰炭燃烧试验,通过检测两次试验中前 10 min 内炉膛上部温度、氧含量变化可以看出

两次试验中运行参数变化很小,说明系统具有稳定性,且本次试验具有可重复性。

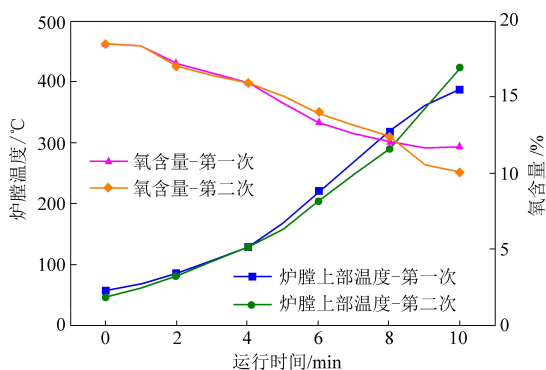


图4 两次兰炭燃烧试验运行参数随运行时间变化曲线图

2.3 点火特性

兰炭的燃烧过程与煤粉燃烧类似,主要分为三个阶段:首先试验中使用点燃燃油,其释放的温度使兰炭中的游离水以及化合水蒸发。随着温度的升高,兰炭中的挥发分开始燃烧,挥发分的燃烧属于均相燃烧^[5],挥发分中的 NH_3 、 H_2 、 CO 等气体与空气中氧气反应^[6],因此反应速率较快,所释放出的热量加热兰炭颗粒,使挥发分进一步得到释放。最后,焦炭开始燃烧,焦炭的燃烧属于非均相反应^[7],因此在相同的燃烧环境下,焦炭燃烧较难进行^[8],该过程需要不断的消耗氧气,且反应速率较慢。

为进一步对比兰炭与煤粉的点火特性,使用热电偶检测在点火 0~10 min 内炉膛上部温度和高温省煤器出口氧含量的变化,检测结果如图 5 所示。从曲线中可以看出,两种燃料在燃烧前 10 min 内炉膛上部温度均呈现迅速上升的现象,第 10 min 炉膛上部温度分别为 388.659 °C 和 585.072 °C,而氧含量呈现迅速下降的现象,说明燃烧前期消耗大量氧气,在第 10 min 时,氧含量分别为 11.736% 和 8.089%。煤粉燃烧时炉膛上部温度更高,氧含量更低,说明在前 10 min 内煤粉的燃烧过程相对剧烈,且煤粉点火更容易,同时在燃烧前期煤粉供料量较大,所以在燃烧初始阶段消耗更多氧气,使热量很快蓄积,炉膛上部温度迅速增加,而兰炭点火较难,供料量较小,所以升温速率较慢、氧含量相对较高^[9]。

2.4 燃烧特性

为了对比兰炭与煤粉的燃烧特性,在不同伴燃条件进行兰炭燃烧试验,最终将燃烧结果与无伴燃条件下的煤粉燃烧进行对比。

2.4.1 燃油+长明火伴燃

为了对比兰炭和煤粉的燃烧特性,分别检测

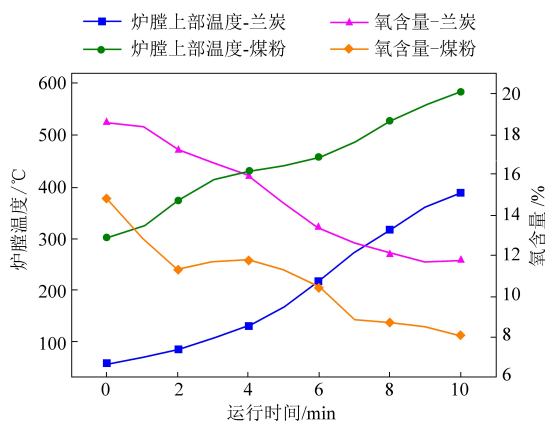


图5 燃烧前 10 min 兰炭与煤粉燃烧对比

在不同负荷下煤粉和兰炭燃烧过程中炉膛上部温度、炉膛下部温度、炉膛出口烟气温、氧含量,检测结果如图 6 所示。根据检测结果,随着锅炉负荷增加,炉膛不同位置温度均呈现缓慢增加的趋势,氧含量呈现降低的趋势。当锅炉负荷从 10 MW 增加至 70 MW 时,兰炭燃烧时炉膛上部温度、炉膛下部温度、炉膛出口烟气温分别增加 454.431 °C、421.194 °C、311.575 °C,而煤粉燃烧炉膛不同位置的温度变化量分别为 383.425 °C、456.896 °C、297.472 °C。对比兰炭燃烧和煤粉燃烧后炉膛不同位置温度变化量,发现随着锅炉负荷增加,对于兰炭燃烧炉膛上部温度变化量更大,说明在该位置燃烧更加剧烈,燃烧强度变化最大,而对于煤粉燃烧而言,炉膛中部温度变化量更大,说明燃烧在该位置燃烧更加剧烈。所以可以判断出,兰炭的燃烧主要集中在炉膛上部,而煤粉的燃烧位置相对靠下。对比两种燃料的煤质分析结果,在相同的燃烧条件下,推测兰炭的燃烧相对煤粉燃烧进程滞后,试验结果与推测结果不符,猜测主要原因是兰炭燃烧过程中有伴燃,改变了整个兰炭燃烧的进程。

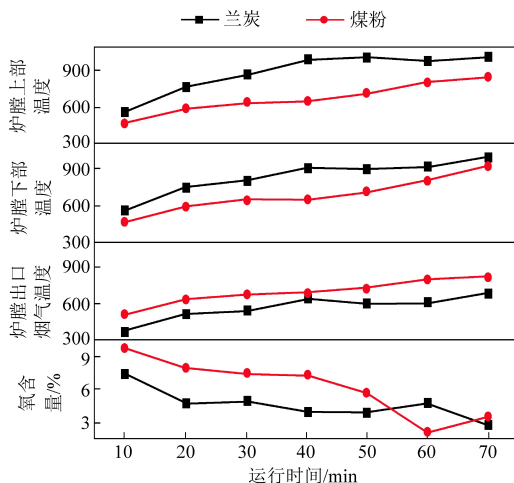


图6 不同负荷下兰炭与煤粉燃烧运行参数对比

2.4.2 无燃油长明火伴燃

为了进一步探究伴燃对于燃烧进程的影响,进行了无燃油长明火兰炭伴燃试验,试验中当系统维持锅炉负荷为 60 MW 且稳定运行 30 min 后,从观火孔中观测火焰状态,确定燃烧稳定后,此时开始进行无燃油伴燃试验,首先按顺序关闭两台燃烧器的点火油阀,观察火焰状态无明显变化后,仅维持长明火伴燃,再观察此时的火焰状态,不同伴燃条件下的火焰状态如图 7 和图 8 所示。在燃油+长明火伴燃条件下火焰的呈蓝色,而去燃油伴燃时,火焰呈淡黄色,根据火焰颜色说明在正常伴燃条件下燃烧温度较高,燃烧强度较大。



图 7 燃油+长明火伴燃条件下的火焰状态

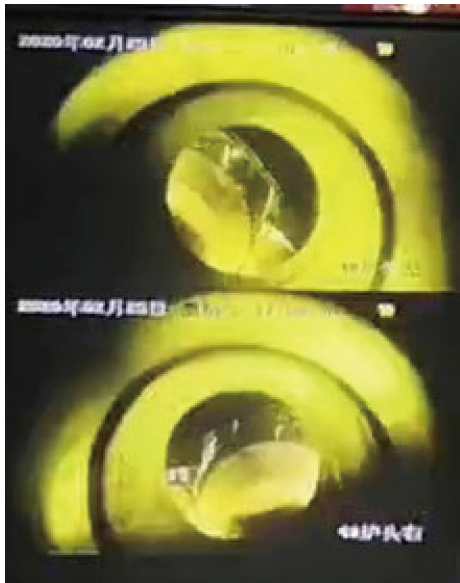


图 8 无燃油伴燃条件下的火焰状态

当锅炉负荷为 70 MW 时,在不同伴燃条件、

不同燃料下锅炉运行参数如表 2 所示。根据试验数据,当去掉燃油伴燃时,炉膛上部温度降低,该结果与火焰状态所分析结果相对应。在燃油+长明火伴燃和无燃油长明火伴燃条件下,炉膛上部温度和炉膛下部温度依次降低,而炉膛烟气出口烟气温度升高,说明增加伴燃可以使燃烧进程提前,能够起到强化燃烧、防止燃烧过程中火焰出现脱火的作用,同时可以改善燃烧过程中的温度分布情况,使烟气出口温度更有利于进一步烟气净化。

对比兰炭的两种伴燃方式,当采用无燃油伴燃方式时炉膛内温度分布与煤粉燃烧时炉膛内的温度分布相似,炉膛上部和下部温差减小,说明随着伴燃强度的增加,炉膛内部燃烧进程越靠前,炉膛内部温度梯度越大,改善温度分布的效果越明显。同时结合不同伴燃条件下兰炭燃烧火焰形态可以看出,增加伴燃对于兰炭燃烧是必要的,对改善兰炭燃烧、快速点火起到很大作用^[11]。

表 2 不同伴燃条件、不同燃料下的锅炉运行参数

燃料	有无伴燃	炉膛上部 温度/℃	炉膛下部 温度/℃	炉膛出口 烟气温度 /℃	氧含量 /%
兰炭	燃油+ 长明灯	1 017.382	981.274	684.193	2.666
兰炭	长明火	989.126	975.702	732.768	3.111
煤粉	无	853.7	923.9	810.3	3.56

2.5 污染物排放特性

2.5.1 NO_x 排放

为了对比兰炭和煤粉燃烧后 NO_x 的初始排放量,根据线上监测结果,记录锅炉运行过程中 NO_x 初始排放量的变化,NO_x 随运行时间的变化如图 9 所示。在锅炉负荷为 70 MW 时,兰炭燃烧和煤粉燃烧的 NO_x 的初始排放量如图 10 所示。

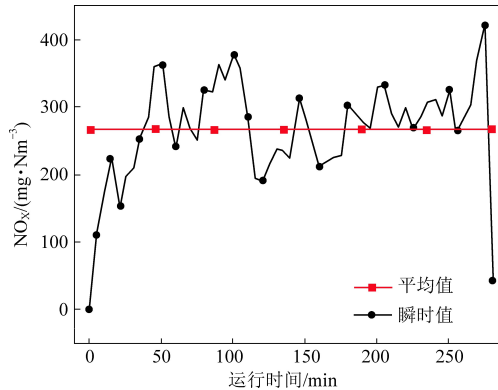
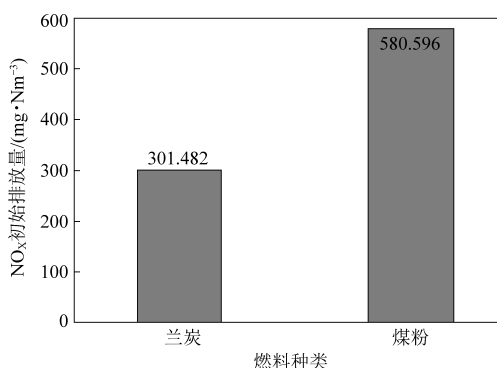


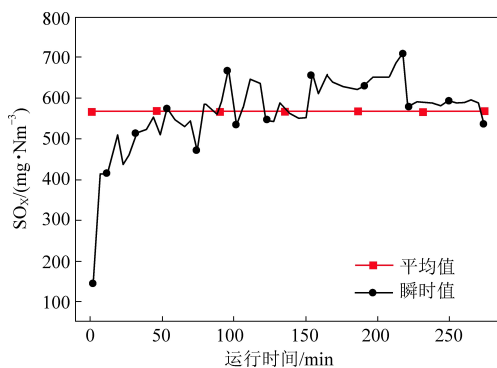
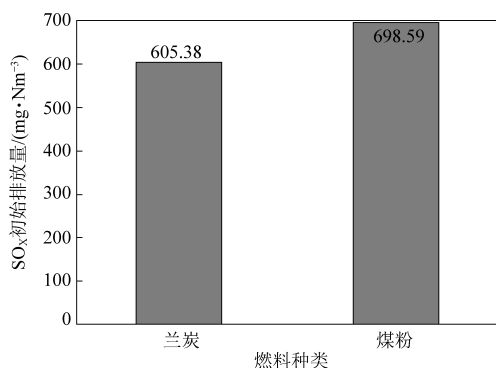
图 9 NO_x 随运行时间的变化曲线

图 10 相同不同负荷下的 NO_x 初始排放量

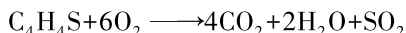
根据图中的结果,随着运行时间的增加,初始 NO_x 含量增加先增加后稳定的趋势,这与锅炉负荷的变化有很大关系。当锅炉负荷为 70 MW 时,兰炭和煤粉燃烧后的 NO_x 初始排放量分别为 301.482 mg/Nm³、580.596 mg/Nm³,兰炭燃烧所产生的初始 NO_x 含量相比于煤粉更低,主要原因一方面是因为根据燃料的元素分析结果,兰炭中氮元素的含量低于煤粉,所以在相同的燃烧条件下,兰炭燃烧所释放出的 NO_x 含量低于煤粉。另外一方面燃烧后所产生的 NO_x 由挥发分氮和焦炭氮组成^[12],由于兰炭中的挥发分含量低,所以在相同条件下所释放出的挥发分氮含量较低,同时由于挥发分所产生的初级火焰较小,而焦炭的燃烧需要挥发分的初级火焰产生热量以及外界的热量引燃焦炭,且焦炭燃烧需要较高的温度,所以兰炭燃烧后所释放出的焦炭氮的含量较少,导致最终总的 NO_x 含量相对于煤粉更低。

2.5.2 SO₂ 排放

为了对比兰炭和煤粉燃烧后 SO₂ 的初始排放量,记录锅炉运行过程中 SO₂ 初始排放量的变化,SO₂ 随运行时间的变化如图 11 所示。在锅炉负荷为 70 MW 时,兰炭燃烧和煤粉燃烧的 SO₂ 的初始排放量如图 12 所示。

图 11 SO₂ 随运行时间的变化曲线图 12 相同不同负荷下的 SO₂ 初始排放量

根据图中曲线,随着运行时间增加,初始 SO₂ 排放量的变化趋势与初始 NO_x 排放量基本一致,但变化趋势相对较小,说明受锅炉负荷的影响较小。当锅炉负荷为 70 MW 时,兰炭和煤粉燃烧后的 SO₂ 初始排放量分别为 605.38 mg/Nm³、698.59 mg/Nm³,兰炭燃烧后初始 SO₂ 排放量低于煤粉,根据元素分析结果,两种燃料中硫元素含量相差不多,而初始排放量出现差异,主要是由于二者燃烧条件以及燃烧过程导致的。当炉膛温度大于 900 ℃ 时,噻吩官能团及其衍生物发生裂解,硫元素释放出来与 O₂ 结合成 SO₂,化学式如下:



根据蒋松等^[13]对煤中硫释放行为的研究发现,煤阶和燃烧温度对煤中硫的释放产生主要影响,煤阶越高,煤中硫的释放率越高,所以在相同的燃烧条件下,煤粉燃烧后释放更多的 SO₂。

3 结论

论文中在 70 MW 双燃料煤粉工业锅炉上进行一系列兰炭、煤粉燃烧试验,分别研究了兰炭燃烧的稳定性,对比了煤粉和兰炭燃烧的点火特性、燃烧特性、污染物排放情况,最终得出以下几点结论:

(1) 将兰炭作为单一燃料在现有锅炉系统上进行燃烧,发现运行时间在 40 min 后锅炉运行参数变化较小,明兰炭燃烧具有一定稳定性,具备作为单一燃料的基本条件。

(2) 对比点火后 10 min 内两种燃料的点火特性,兰炭和煤粉燃烧过程中炉膛温度变化量分别是 388.659 ℃ 和 585.072 ℃,氧含量变化量分别为 11.736% 和 8.089%,说明煤粉的燃烧在燃烧前期更剧烈。

(3) 在不同的伴燃条件下进行兰炭燃烧,发现增加伴燃后当锅炉负荷从 10 MW 增加至 70 MW

时,兰炭燃烧和煤粉燃烧炉膛上部温度变化量分别为 454.431 ℃、383.425 ℃,说明兰炭燃烧在锅炉上部更剧烈。同时结合两种燃料燃烧炉膛温度变化可以得出伴燃可以有效改善兰炭着火难的问题,提高燃烧的强度,改善炉膛内的温度分布情况、使燃烧进程前移,为后续的烟气净化创造有利条件。

(4)对比在不同伴燃条件下的兰炭燃烧试验,发现当锅炉负荷 70 MW 时,采用燃油+长明火伴燃和无燃油伴燃时,炉膛上部温度分别为 1 017.382 ℃、989.126 ℃,同时结合炉膛温度情况,发现随着伴燃强度增加,燃烧强度越大,燃烧进程越靠前。

(5)通过对比兰炭与煤粉燃烧的初始 NO_x 及 SO_2 排放情况,发现兰炭初始排放量均低于煤粉,说明兰炭是一种跟清洁的燃料。

(6)通过一系列的燃烧试验发现,兰炭可以作为单一燃料替代烟煤燃烧,且其能够实现更清洁的燃烧。在现有的双燃料燃烧系统中,根据煤粉燃烧效果,可以考虑在煤粉燃烧过程中适当增加伴燃,强化炉膛上部煤粉的着火,对提高煤粉的燃尽率,提高燃烧稳定性有很好的作用。同时通过考虑烟气出口温度等数据参数,改变目前兰炭伴燃的强度以及伴燃方式,是一种优化兰炭燃烧有效方式。

参考文献

[1] 杨洪楠. 兰炭制备活性炭的方法研究 [D]. 马鞍山: 安徽

工业大学, 2015: 3-5.

- [2] 牛芳. 煤粉工业锅炉燃烧兰炭试验研究 [J]. 洁净煤技术, 2015, 2 (21): 106-108.
- [3] 张孝禹. 兰炭在流化床中燃烧特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 32-38.
- [4] 张华, 张建良, 徐润生, 等. 兰炭与烟煤混合燃烧特性及机制分析 [J]. 中国冶金, 2016, 26 (2): 7-12+30.
- [5] 盛昌栋, 徐明厚. 高浓度煤粉着火阶段燃烧特性的试验研究 [J]. 华中理工大学学报, 1995, 23 (7): 64-68.
- [6] 敦启孟, 陈兆辉, 皇甫林, 等. 温度和停留时间对煤热解挥发分二次反应的影响 [J]. 过程工程学报, 2018, 18 (1): 140-147.
- [7] 刘皓, 陆继东, 冯波, 等. 焦炭的非均相反应对循环流化床煤燃烧中 N_2O 生成与分解的影响 [J]. 中国电机工程学报, 1998 (4): 14-17.
- [8] 雍玉梅, 吕清刚, 那永洁. 煤种对循环流化床焦炭燃烧速率的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2005 (1): 50-54.
- [9] 李文浩. 炉内温度分布及热辐射参数检测的试验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 21-30.
- [10] 伊振康. 循环流化床锅炉贫瘦煤伴燃点火启动技术 [J]. 电力与电工, 2011, 31 (2): 42-44.
- [11] 周国义, 孙亦鹏, 娄春, 等. 增压锅炉燃烧监测试验研究 [J]. 热能动力工程, 2009, 24 (6): 84-87+137.
- [12] 黄晓宏, 王定帮, 史云烨, 等. O_2/CO_2 条件下焦炭氮向 NO 的转化特性 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32 (3): 537-539.
- [13] 蒋松, 陶秀祥, 袁宝泉. 煤中硫的释放行为及影响因素 [J]. 中国矿业, 2013, 22 (11): 136-140.